



Génération d'environnements pour la simulation comportementale de vecteurs épidémiques : application à *Aedes aegypti*, vecteur de la dengue et du virus zika

Renaud Misslin



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/rfst/619>

DOI : 10.4000/rfst.619

ISSN : 2492-3672

Éditeur

Espaces et SOciétés (UMR 6590)

Référence électronique

Renaud Misslin, « Génération d'environnements pour la simulation comportementale de vecteurs épidémiques : application à *Aedes aegypti*, vecteur de la dengue et du virus zika », *Revue francophone sur la santé et les territoires* [En ligne], Ateliers et séminaires, mis en ligne le 25 novembre 2016, consulté le 06 avril 2021. URL : <http://journals.openedition.org/rfst/619> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/rfst.619>

Ce document a été généré automatiquement le 6 avril 2021.



La *Revue francophone sur la santé et les territoires* est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions 4.0 International.

Génération d'environnements pour la simulation comportementale de vecteurs épidémiques : application à *Aedes aegypti*, vecteur de la dengue et du virus zika

Renaud Misslin

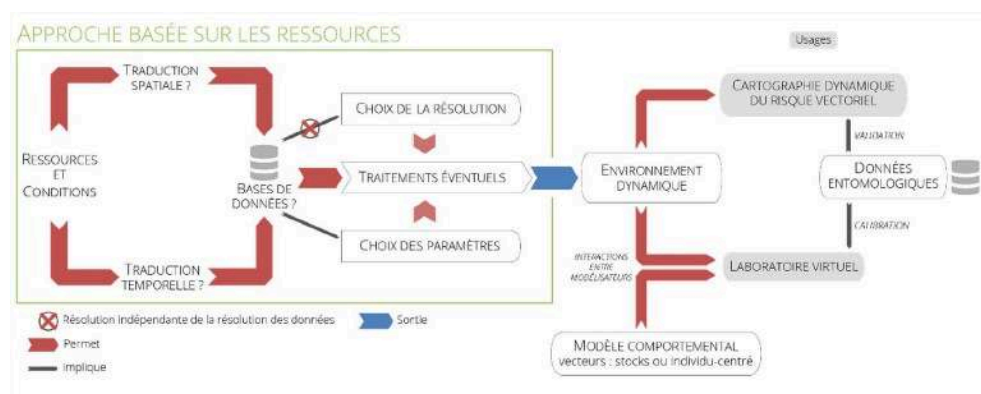
- 1 Le moustique *Aedes aegypti* est le vecteur principal de la dengue et du virus Zika. Il est surtout présent dans les villes des zones tropicales et intertropicales d'Afrique, d'Amérique et d'Asie (Rodhain 1996). À moyen terme, les vaccins en cours de développement contribueront probablement au recul de ces maladies. Néanmoins, l'émergence ou la réémergence de maladies transmises par ces moustiques (comme la récente réémergence du Zika en Amérique Latine) font des mesures anti-vectorielles des éléments majeurs de la lutte contre ces maladies. Ces mesures consistent à modifier l'environnement dans le but de limiter le développement des moustiques (nettoyage, drainage et destruction des gîtes larvaires potentiels), de réduire leurs populations (traitements chimiques des gîtes, fumigation, introduction de prédateurs ou de mâles stériles) et de limiter les interactions entre hôtes et vecteurs (utilisation de moustiquaires ou de répulsifs). L'amélioration des moyens de surveillance des aires de distribution des vecteurs en milieu urbain et péri-urbain doit permettre d'optimiser l'utilisation de ces moyens dans le temps et l'espace (Gubler 2002).
- 2 Les facteurs qui influencent le développement de populations d'*Ae. aegypti* sont inégalement distribués dans les espaces urbains et leur présence évolue dans le temps. La variété de combinaisons de ces facteurs rend difficile la mise en évidence de causalités simples permettant d'expliquer et d'estimer les densités vectorielles. Les nombreuses études de terrain réalisées dans les villes d'Asie et d'Amérique permettent d'identifier des relations entre ces facteurs environnementaux et la présence de moustiques (e.g. Arunachalam et al. 2010). Cependant, ces observations empiriques

valables au niveau local peuvent difficilement être transposées d'un contexte urbain à un autre. À titre d'exemple, la végétation est négativement corrélée à la présence de moustiques dans certaines villes (e.g. en Floride, États-Unis (Rey et al. 2006)) alors que dans d'autres cas, elle y est positivement corrélée (e.g. à Tucson, États-Unis (Landau et van Leeuwen 2012)). Les coûts élevés de ce type d'études de terrain sont susceptibles de les rendre inabordables pour de nombreuses administrations. Devant la difficulté de réaliser des mesures de cette diversité, de transposer les résultats de ces mesures et au vue de l'incapacité des expériences de laboratoire à reproduire les combinaisons de facteurs observées dans la réalité, la simulation informatique, plus particulièrement la simulation à base d'agents, apparait comme une alternative intéressante à ces obstacles. Cette méthode de modélisation permet de réaliser des expériences *in silico* sur des phénomènes difficilement observables dans la réalité.

- 3 Depuis 2008, plusieurs modèles à base d'agents permettent de reproduire les dynamiques spatiales des populations d'*Ae. aegypti* (e.g. Bomblies, Duchemin, et Eltahir 2008 ; Almeida et al. 2010 ; Karl et al. 2014). Quels que soient l'échelle et le terrain d'étude pour lesquelles ils sont produits, ces modèles présentent de notre point de vue un inconvénient majeur : ils ne sont pas transposables d'une ville à une autre, d'une période à une autre et d'une échelle à une autre. Dans le cadre du projet DENFREE (FP7), un modèle à base d'agents permettant de simuler les comportements de moustiques individuels dans l'espace a été implémenté (MOMA (Maneerat et Daudé 2016)). Cet outil permet d'étudier les dynamiques de population de moustiques évoluant dans des conditions environnementales spécifiques. Ce travail de thèse a pour objectif d'élaborer un modèle (MODE) permettant de reconstruire *in silico* des environnements urbains, aussi bien pour des agglomérations entières que des quartiers ou des ensembles de quartiers au sein de ces agglomérations. Afin de rendre le modèle transposable d'une ville à une autre ou d'une période d'étude à une autre, celui-ci est construit à partir de données libres (images satellites, données météorologiques) ou aisément accessibles (données démographiques intra-urbaines).
- 4 L'objectif général de MODE est donc de reproduire les dynamiques spatiotemporelles des ressources et conditions permettant à *Aedes aegypti* d'accomplir son cycle de vie. Celles-ci sont définies dans MOMA qui simule le développement d'individus moustiques dont les besoins évoluent en fonction du stade de vie (3 stades aquatiques (œuf – larve – nymphe) et un stade adulte aérien). Les ressources sont au nombre de deux : le nectar et le sang. Elles sont consommées par les moustiques dans un objectif d'alimentation. Les conditions sont des facteurs environnementaux non-consommés influençant directement la répartition spatio-temporelle des moustiques. Il s'agit de l'eau fraîche et claire permettant aux moustiques d'accomplir leurs stades de vie aquatiques, des gîtes larvaires potentiels (réceptacles susceptibles de contenir de l'eau et de servir de lieu de ponte) et de la température de l'air, facteur essentiel de répartition aussi bien localement, à l'échelle de la ville (Misslin et al. 2016), qu'au niveau global (limite thermique aux latitudes 30° Nord et Sud).
- 5 Les dynamiques spatiales et temporelles de ces ressources et conditions ne peuvent pas être mesurées directement par le biais d'images satellites ou de données démographiques librement disponibles (par exemple, les gîtes larvaires potentiels sont trop petits pour être visibles sur des images satellites (Moloney et al. 1998)). De ce fait, chacune de ces ressources et conditions ont été associées à des proxys traduisant la répartition des facteurs spatialement et temporellement (Figure 1). Ces distributions

spatiotemporelles sont ensuite estimées pour une zone d'étude spécifique. Les proxys utilisés pour estimer les distributions des ressources sont la végétation, permettant d'estimer la distribution de nectar, et les hommes dont la densité permet d'estimer la capacité d'un espace à fournir du sang. Les répartitions spatiotemporelles des conditions sont estimées de façons similaires : la présence d'eau est liée aux précipitations, au remplissage manuel par des hommes et à l'évaporation et la présence de gîtes larvaires potentiels est liée au nombre de ménages (Karl et al. 2014). La dernière condition, la température de l'air, peut être estimée directement.

Figure 1 : Chaîne de traitements pour la construction de MODE



- 6 MODE est donc un modèle d'environnement dynamique, implémenté sous GAMA, pouvant être couplé à MOMA. Un des objectifs de ce modèle est de permettre la génération d'environnements à plusieurs échelles différentes. Nous en avons identifié deux principales : celle de la ville dite « macro » et celle du quartier dite « micro ». L'échelle macro fait référence à une résolution de quelques dizaines (voir centaines) de mètres (typiquement : 30-50 m, zone correspondant approximativement à l'espace de vie d'un moustique) pour une étendue de plusieurs dizaines, voire centaines, de km² (étendue qui correspond à la taille d'une grande ville. Cette échelle permet par exemple d'identifier les espaces les plus favorables aux moustiques dans une ville et guider les autorités sanitaires dans les opérations de lutte anti-vectorielle (Karl et al. 2014). Ce type d'environnement peut être associé à un modèle comportemental fonctionnant sous forme de stocks (la gestion d'individus moustiques à l'échelle d'une ville nécessiterait des capacités computationnelles bien trop élevées). L'échelle appelée « micro » dans le cadre de MODE est caractérisée par une étendue plus réduite (celle d'un bloc de bâtiments, d'un quartier) ne dépassant pas quelques km². Sa résolution est de quelques mètres. Ce type d'environnement peut, une fois couplé avec un modèle individu-centré, être utilisé comme un laboratoire virtuel (Almeida et al. 2010).
- 7 À l'échelle macro, MODE se présente sous la forme d'une grille composée de « cellules environnement » (CE). Chaque CE est caractérisée par 5 variables correspondant aux ressources et aux conditions décrites ci-dessus. La génération de l'environnement à cette échelle est principalement basée sur le traitement d'images satellites OLI et TIRS (Landsat 8) et MODIS (Terra ou Aqua), sur des données démographiques spatialisées et sur des données météorologiques. La taille d'une CE est donnée par la résolution la plus fine parmi les images satellites utilisées, en l'occurrence, celle des images OLI et TIRS qui est de 30 m. Le processus de génération de l'environnement consiste à donner des valeurs aux 5 variables contenues dans chacune des CE. La valeur de la variable

ressource végétation est estimée grâce au Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Tucker 1979) calculé sur des images OLI. Cet indice donne une mesure de l'activité végétale au sein d'un pixel. Le nombre d'habitants par CE est estimé par le biais d'une méthode de cartographie dasymétrique (Reibel et Agrawal 2007). Dans le cadre de MODE, cette méthode est utilisée pour affiner des données démographiques spatialisées en redistribuant la population par rapport à l'occupation du sol et la température de surface. De la même manière que les ressources, les conditions sont estimées par le biais d'un proxy. La présence d'eau est estimée par le biais de données de précipitations mesurées par une station météorologique localisée dans la ville étudiée. L'évaporation peut être calculée en se basant sur la température et la latitude grâce à l'équation de Linacre (Linacre 1977). La répartition des gîtes larvaires potentiels (GLP) dans l'espace urbain est très largement liée à la présence des hommes et à leurs activités (Ooi et al. 2006). Dans MODE, le nombre de GLP dans une CE est estimé en partant de l'hypothèse que les ménages en sont les principaux producteurs (les cellules environnement associées à de l'eau ne produisent pas de GLP). Le nombre de ménages par CE est calculé par une méthode de cartographie dasymétrique similaire à celle utilisée pour ventiler les individus. Enfin, l'estimation de la température de l'air est basée sur l'indice température-végétation (TVX) calculé sur des images MODIS (1 image toutes les 12h). L'approche TVX repose sur une hypothèse principale : la température de surface mesurée d'une canopée entièrement végétalisée est en équilibre thermique avec la température de l'air de cette canopée (Vancutsem et al. 2010). En partant de cette hypothèse, il est possible de calculer la relation entre la température de surface et la présence de végétation (mesurée par le NDVI). Si ces deux variables sont corrélées négativement, la méthode TVX peut être appliquée.

- 8 La génération d'environnements à l'échelle micro est entravée par la non-disponibilité de données libres et précises permettant de reconstruire la niche écologique potentielle du moustique. De fait, les environnements fins, comme ceux créés pour certains modèles à base d'agents individus-centrés permettant de simuler le comportement de moustiques (Almeida et al. 2010; Maneerat et Daudé 2016), incluent des données très fines, difficiles à extraire de façon directe d'images libres d'accès, souvent de moyenne résolution (e.g. OLI et TIRS). Afin de pallier cette limite, nous avons développé une méthode de génération « d'environnements synthétiques ». Celle-ci consiste à générer un environnement fin en se basant sur des données agrégées, de préférence libres, disponibles à une échelle plus large. La génération d'environnements synthétiques donne au modélisateur la possibilité de produire automatiquement des données réalistes répondant à ses attentes en termes d'échelle. Cette méthode présente un intérêt particulier pour les études menées dans des pays du Sud, sur des étendues relativement larges pour lesquelles les données fines d'occupation du sol (la localisation des bâtiments notamment) n'existent pas (même sur OSM) ou sont soumises à des accès restreints.
- 9 À l'échelle micro, MODE se présente sous la forme d'un ensemble d'objets vectoriels juxtaposés. La génération automatique de ces objets est basée sur les données produites à l'échelle macro. L'apport principal de cette démarche est sa capacité à produire des bâtiments individualisés. Ces bâtiments hébergent des habitants et ont un impact important sur la capacité de dispersion des populations de moustiques (Maneerat et Daudé 2016). La génération de l'environnement se déroule en plusieurs étapes successives. Le point de départ est une grille composée de « cellules environnements » dont les caractéristiques sont les mêmes que celles créées dans le cadre de la version

macro de MODE. Dans un premier temps, chacune des cellules est définie comme « non-bâtie » ou « potentiellement bâtie » grâce à un tirage aléatoire pondéré par les indices de NDVI et de NDBI (Bhatti et Tripathi 2014) et en fonction de l'empreinte spatiale des réseaux routiers et hydrographiques issus d'Open Street Map. Ensuite, le nombre de ménages et le nombre d'habitants par CE sont utilisés pour constituer des agents « ménage » composés d'un ou plusieurs individus. Les bâtiments sont ensuite positionnés sur les CE en fonction du nombre de ménages correspondant à chacune des CE. Le nombre de GLP est calculé pour chaque bâtiment (GLP situés à l'intérieur) et pour chaque CE (GLP situés à l'extérieur). Enfin, la température de l'air calculée par le biais de la méthode TVX est affinée en fonction de la distribution des bâtiments. Les dynamiques de MODE-micro sont calquées sur les données météorologiques (précipitations, évaporation et température de l'air).

- 10 À chacune des échelles, MODE peut-être confronté à la réalité de terrain ou à d'autres bases de données dans un but de validation. À l'échelle macro, la cartographie dynamique du risque vectoriel émanant de l'assemblage des différentes caractéristiques des CE peut être comparée à des données vectorielles mesurées sur le terrain. À l'échelle micro, la validation peut être réalisée en comparant l'occupation du sol générée de façon synthétique à une occupation du sol issue de traitements réalisés sur des images de très haute résolution spatiale (e.g. Ikonos, Worldview 3, Quickbird). Une autre méthode de validation consisterait à comparer l'occupation du sol générée à des bases de données géographiques vectorielle produites par les administrations de la ville étudiée (e.g. BDTPO de l'IGN). Le niveau de difficulté d'accès à ce type de base de données dépend du contexte local.
- 11 Les méthodes décrites ci-dessus peuvent être appliquées à de nombreuses villes situées dans les zones infestées par le moustique. La méthode proposée de génération d'environnements synthétique permet au modélisateur de s'affranchir en partie de la résolution des données initiales (Figure 1). À l'échelle macro aussi bien qu'à l'échelle micro, MODE permet de générer un environnement dynamique construit sous la forme d'un modèle à base d'agents. Ce modèle peut être utilisé pour déterminer la niche écologique potentielle du vecteur ou comme laboratoire virtuel s'il est couplé à un modèle à base d'agents permettant de simuler le comportement et les déplacements d'*Ae. aegypti*. Dans le dernier cas, le modèle résultat du couplage d'un modèle environnemental (MODE) et d'un modèle comportemental (MOMA) peut être calibré par le biais de mesures vectorielles effectuées sur le terrain. Cette communication consistera à présenter une application de la méthode à la ville de Bangkok (Thaïlande).

BIBLIOGRAPHIE

Almeida, Sandro Jerônimo de, Ricardo Poley Martins Ferreira, Álvaro E. Eiras, Robin P. Obermayr, et Martin Geier. 2010. « Multi-Agent Modeling and Simulation of an *Aedes Aegypti* Mosquito Population ». *Environmental Modelling & Software* 25 (12) : 1490-1507. doi:10.1016/j.envsoft.2010.04.021.

- Arunachalam, Natarajan, Susilowati Tana, Fe Espino, Pattamaporn Kittayapong, Wimal Abeyewickreme, Khin Thet Wai, Brij Kishore Tyagi, Axel Kroeger, Johannes Sommerfeld, et Max Petzold. 2010. « Eco-bio-social determinants of dengue vector breeding: a multicountry study in urban and periurban Asia ». *Bulletin of the World Health Organization* 88 (3) : 173-84. doi:10.2471/BLT.09.067892
- Bhatti, Saad Saleem, et Nitin Kumar Tripathi. 2014. « Built-up Area Extraction Using Landsat 8 OLI Imagery ». *GIScience & Remote Sensing* 51 (4) : 445-67. doi:10.1080/15481603.2014.939539.
- Bombliès, Arne, Jean-Bernard Duchemin, et Elfatih A. B. Eltahir. 2008. « Hydrology of Malaria: Model Development and Application to a Sahelian Village: HYDROLOGY OF MALARIA ». *Water Resources Research* 44 (12) : n/a-n/a. doi:10.1029/2008WR006917.
- Gubler, Duane J. 2002. « Epidemic dengue/dengue hemorrhagic fever as a public health, social and economic problem in the 21st century ». *TRENDS in Microbiology* 10 (2) : 100-103.
- Karl, Stephan, Nilimesh Halder, Joel K Kelso, Scott A Ritchie, et George J Milne. 2014. « A Spatial Simulation Model for Dengue Virus Infection in Urban Areas ». *BMC Infectious Diseases* 14 (1) : 447. doi:10.1186/1471-2334-14-447.
- Landau, Katheryn I., et Willem JD van Leeuwen. 2012. « Fine scale spatial urban land cover factors associated with adult mosquito abundance and risk in Tucson, Arizona ». *Journal of Vector Ecology* 37 (2) : 407-418.
- Linacre, Edward. 1977. « A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone ». *Agricultural Meteorology* 18 : 409-24.
- Maneerat, Somsakun, et Eric Daudé. 2016. « A Spatial Agent-Based Simulation Model of the Dengue Vector *Aedes Aegypti* to Explore Its Population Dynamics in Urban Areas ». *Ecological Modelling* 333 (août) : 66-78. doi:10.1016/j.ecolmodel.2016.04.012.
- Misslin, Renaud, Olivier Telle, Eric Daudé, Alain Vaguet, et Richard E. Paul. 2016. « Urban Climate versus Global Climate Change-What Makes the Difference for Dengue?: Climate, Dengue, and Urban Heat Islands ». *Annals of the New York Academy of Sciences* 1382 (1) : 56-72. doi:10.1111/nyas.13084.
- Moloney, James M., Chris Skelly, Philip Weinstein, Maxine Maguire, et Scott Ritchie. 1998. « Domestic *Aedes aegypti* breeding site surveillance: limitations of remote sensing as a predictive surveillance tool. » *The American journal of tropical medicine and hygiene* 59 (2) : 261-264.
- Ooi, Eng-Eong, Kee-Tai Goh, Duane J. Gubler, et others. 2006. « Dengue prevention and 35 years of vector control in Singapore ». *Emerg Infect Dis* 12 (6) : 887-893.
- Reibel, Michael, et Aditya Agrawal. 2007. « Areal Interpolation of Population Counts Using Pre-Classified Land Cover Data ». *Population Research and Policy Review* 26 (5-6) : 619-33. doi:10.1007/s11113-007-9050-9.
- Rey, Jorge R., Naoya Nishimura, Billi Wagner, Marieta AH Braks, Sheila M. O'Connell, et L. Philip Lounibos. 2006. « Habitat segregation of mosquito arbovirus vectors in south Florida ». *Journal of Medical entomology* 43 (6) : 1134-1141.
- Rodhain, Francois. 1996. « Les insectes ne connaissent pas nos frontières ». *Médecine et maladies infectieuses*, n° 26 : 408-14.
- Tucker, Compton. 1979. « Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation.pdf ». *Remote Sensing of Environment* 8 : 127-50.

Vancutsem, Christelle, Pietro Ceccato, Tufa Dinku, et Stephen J. Connor. 2010. « Evaluation of MODIS Land Surface Temperature Data to Estimate Air Temperature in Different Ecosystems over Africa ». *Remote Sensing of Environment* 114 (2) : 449-65. doi:10.1016/j.rse.2009.10.002.

INDEX

Mots-clés : moustiques, dengue, Zika, modifications environnementales, simulation, modélisation

Index géographique : Afrique, Amérique latine, Asie

AUTEUR

RENAUD MISSLIN

UMR IDEES 6266, Université de Rouen